

## 非移变模式机载双基地 SAR 成像算法及实验结果

龚镇强 张晓玲

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘要:** 该文通过对机载双基地 SAR 非移变几何模型的分析,建立了双距离变量域的回波信号模型,由于回波数据是在距离和域,该文推导了距离和变量与双距离变量的转换关系,解决了该模型向距离和变量域转换的问题;提出了适用于非移变模式的变多普勒参数的双基地 RD 算法,并对该算法中引入变多普勒斜率所存在的误差进行了仿真分析。最后通过双基 SAR 仿真及实测数据处理,证实了算法的有效性,并与常规 RD 算法进行了比较,显示了该方法的优越性。

**关键词:** 双基地 SAR RD 算法; 变多普勒参数估计; 双基 SAR 实验结果

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0173-04

## Translationally Invariant Airborne Bistatic SAR Imaging Algorithm and Experimental Result

Gong Zhen-qiang Zhang Xiao-ling

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Based on the analysis of bistatic SAR geometry model, bistatic SAR echoed signal is modeled in the double range variables domain in this paper, and the relationship between the double range variable domain and the single range variable domain is established. Then a range-dependent Doppler algorithm for imaging processing airborne bistatic SAR raw data of the translationally invariant configuration is derived, and the effect of error of the algorithm is analyzed by simulating. The algorithm is also tested with real data, and the advantage of the algorithm is proved by the comparison with bistatic SAR traditional RD algorithm.

**Key words:** Bistatic SAR RD algorithm; Range-dependent Doppler parameter estimation; Real-data SAR experimental result

### 1 引言

双基地 SAR 指收发平台分置的 SAR 系统。它能获取目标的非后向散射信息,有利于目标识别和反隐身。由于接收机不发射信号,提高了系统的隐蔽性和抗干扰能力。

目前,关于双基地 SAR 成像算法的文献较多。极坐标算法和后向投影(BP)算法适用于一般飞行模式成像。极坐标算法忽略了距离弯曲,成像幅宽受到限制。后向投影算法逐点处理,需要高倍数、高精度的插值。文献[1-3]中,提出了通过修改单基地 RD、WK、CS 成像算法实现双基地成像,这些方法适用于非移变模式(translationally invariant configuration),文献[4]中提出了一种适用一般模式(general configuration)的双基地成像算法,该方法把数据看成由类单站项和双基地畸变项构成,处理时先补偿双基地畸变项,然后使用单基地成像算法处理,但该算法模型复杂,运算量很大。

本文提出了变多普勒参数的双基地 RD 算法,适用于非移变模式的双基 SAR 成像处理。首先在目标到发射机距离

和目标到接收机距离的双距离变量域,建立了双基地 SAR 点目标回波信号模型,得到了多普勒参数公式。由于双基地 SAR 回波数据体现为距离和变量域,所以需要把多普勒参数公式转换到距离和变量域,才能分析并处理回波数据,因此推导了距离和变量与双距离变量的转换关系,得到了距离和的多普勒参数公式,基于该公式实现了变调频斜率 RD 算法,并通过实测数据验证了算法的有效性。

### 2 非移变模式下的变多普勒参数的双基地 RD 成像算法

#### 2.1 几何模型及点目标冲激响应

非移变模式是指双基地 SAR 收发载机以大小相等,方向相同的速度飞行,工作几何关系如图 1。在图 1 中,发射天线波束与接收天线波束的斜视角分别为  $\theta_T$  和  $\theta_R$ 。

设发射机的发射信号如式(1)所示:

$$p(\tau) \cdot \exp(j2\pi f_c \tau) \quad (1)$$

其中  $p(\tau)$  一般为线性调频信号,  $f_c$  为载波频率,则在场景中任意点目标  $\mathbf{r} = (x, y, 0)^T$  处的回波为(去载频后,忽略常数因子和窗函数):

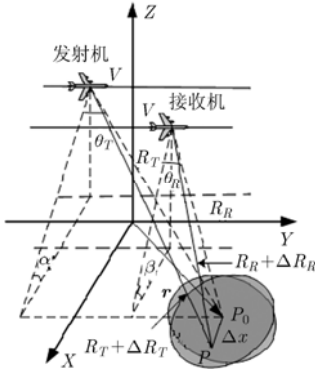


图1 非移变双基地 SAR 工作几何关系图

$$h(\tau, t; \mathbf{r}) = p\left(\tau - \frac{R(t; \mathbf{r})}{c}\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}R(t; \mathbf{r})\right\} \quad (2)$$

其中  $\tau$ 、 $t$  分别为快时间和方位时间， $c$  为光速， $\lambda$  为波长。

$R(t; \mathbf{r})$  为点目标  $\mathbf{r}$  的双站距离史：

$$\begin{aligned} R(t, \mathbf{r}) &= R_T(t, \mathbf{r}) + R_R(t, \mathbf{r}) \\ &= \sqrt{(Vt)^2 + R_T^2 - 2VtR_T \sin \theta_T} \\ &\quad + \sqrt{(Vt)^2 + R_R^2 - 2VtR_R \sin \theta_R} \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $V$  为发射机与接收机的速度， $R_T$ 、 $R_R$  分别为在合成孔径中心 ( $t = 0$ ) 时刻，发射机与接收机到点目标  $\mathbf{r}$  的距离。

## 2.2 算法原理

双基地 RD 算法与单站 RD 算法思想类似，都是通过将距离史在合成孔径中心时刻 ( $t = 0$ ) 进行二阶泰勒展开，但是在双基地 SAR 时，距离和为收发平台公共贡献，所以双基地 SAR 距离史的二阶展开式为

$$\begin{aligned} R(t, \mathbf{r}) &\approx R(t, \mathbf{r})|_{t=0} + R'(t, \mathbf{r})|_{t=0}t + \frac{1}{2}R''(t, \mathbf{r})|_{t=0}t^2 \\ &= R_T + R_R - V(\sin \theta_T + \sin \theta_R)t \\ &\quad + \frac{1}{2}V^2\left(\frac{\cos^2 \theta_T}{R_T} + \frac{\cos^2 \theta_R}{R_R}\right)t^2 \\ &= R_T + R_R - \lambda f_{dc}t - \frac{\lambda}{2}f_{dr}t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中多普勒质心  $f_{dc}$

$$f_{dc} = -\frac{R'(t, \mathbf{r})|_{t=0}}{\lambda} = \frac{V(\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\lambda} \quad (5)$$

多普勒调频斜率  $f_{dr}$

$$f_{dr} = -\frac{R''(t, \mathbf{r})|_{t=0}}{\lambda} = -\frac{V^2}{\lambda}\left(\frac{\cos^2 \theta_T}{R_T} + \frac{\cos^2 \theta_R}{R_R}\right) \quad (6)$$

将式(4)代入式(2)，通过驻定相位原理易得点目标冲激响应的二维频域表达式：

$$\begin{aligned} H^*(f_r, f) &\approx P^*(f_r) \exp\left\{j\pi\frac{2\pi}{\lambda}(R_T + R_R)\right\} \exp\left\{j\pi\frac{(f - f_{dc})^2}{f_{dr}}\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi R_f(f)}{c}f_r\right\} \exp\left\{j\pi\frac{f^2}{f_c^2 f_{dr}}f_r^2\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $R_f(f) = R_T + R_R - [\lambda/(2f_{dr})](f^2 - f_{dc}^2)$ ， $f_r$  为快时间的频域， $f$  为慢时间频域， $f_c$  为载波频率， $P(f_r)$  为发射信号  $p(\tau)$

的频谱。

由式(7)可知，其中第1项为 RD 算法中的距离压缩参考函数；第2项反映了不同点的距离信息，对聚焦处理没有影响；第3项为方位压缩参考函数；第4项为距离徙动矫正项；第5项为二次距离压缩项。可见第3、4、5项都与  $f_{dr}$  有关，但是由于  $f_{dr}$  是随着斜距不同而变化(见式(6))，尤其当平台高度低、收发作用距离比较近时， $f_{dr}$  在测绘区内的变化很大，对成像处理影响很大，成像时必须考虑不同距离门具有不同多普勒调频斜率的情况。但是由式(6)也看出，多普勒调频斜率建立在双距离变量域，即  $R_T$  和  $R_R$  域，而实际回波数据为双基地距离和变量域，即  $R_s$  ( $R_s = R_T + R_R$ ) 域，因此需要把多普勒调频斜率从双距离变量域转换到距离和域，才能更有效地分析并处理实际回波数据。

## 2.3 调频斜率与距离和的关系式

为了推导调频斜率与距离和的关系，令在合成孔径中心，散射点到发射机斜距与接收机斜距之比为  $k$ ：

$$k = R_T/R_R \quad (8)$$

距离和  $R_s$  为

$$R_s = R_T + R_R \quad (9)$$

将式(8)、式(9)代入式(6)，可得

$$f_{dr} = -\frac{V^2}{\lambda R_s} \left( \cos^2 \theta_T + \cos^2 \theta_R + \frac{\cos^2 \theta_T}{k} + k \cos^2 \theta_R \right) \quad (10)$$

其中  $k$  仍然为  $R_s$  的函数。下面推导其关系式，在图1中，参考点目标为  $P_0$ ，发射机和接收机到  $P_0$  的距离分别为  $R_{P_0T}$  和  $R_{P_0R}$ 。任意点目标为  $P$ ，与  $P_0$  地距相差  $\Delta x$ ，发射机和接收机到  $P$  的距离分别为  $R_{P_0T} + \Delta R_T$  和  $R_{P_0R} + \Delta R_R$ 。发射机和接收机与  $P_0$  连线与地平线所成角分别为  $\alpha$  和  $\beta$ 。

由图1几何关系可知：

$$\Delta R_T \approx \cos \theta_T \cos \alpha \cdot \Delta x \quad (11)$$

$$\Delta R_R \approx \cos \theta_R \cos \beta \cdot \Delta x \quad (12)$$

令  $\gamma$  为  $\Delta R_T$  与  $\Delta R_R$  之比，由式(11)、式(12)可得

$$\gamma = \frac{\Delta R_T}{\Delta R_R} \approx \frac{\cos \theta_T \cos \alpha}{\cos \theta_R \cos \beta} \quad (13)$$

其中  $\gamma$  在整个场景中通常可看成常数，可用场景中心处的值代替整个场景。记  $\Delta R_s$  为距离和的变化， $R_{sP_0}$ 、 $R_s$  分别为  $P_0$ 、 $P$  各自到发射机斜距与接收斜距之和， $k_{P_0}$ 、 $k$  分别为  $P_0$ 、 $P$  各自到发射机斜距与接收斜距之比，即如下式：

$$\Delta R_s = R_s - R_{sP_0} = \Delta R_T + \Delta R_R \quad (14)$$

$$k_{P_0} = R_{P_0T}/R_{P_0R} \quad (15)$$

$$k = \frac{R_{P_0T} + \Delta R_T}{R_{P_0R} + \Delta R_R} \quad (16)$$

由式(13)–(16)可将  $k$  在  $k_{P_0}$  处展开成  $R_s$  的关系式：

$$\begin{aligned} k &= k_{P_0} - \frac{(1 + k_{P_0})(k_{P_0} - \gamma)}{(1 + \gamma)R_{sP_0} + (1 + k_{P_0})\Delta R_s} (R_s - R_{sP_0}) \\ &\approx k_{P_0} - \frac{(1 + k_{P_0})(k_{P_0} - \gamma)}{(1 + \gamma)R_{sP_0}} (R_s - R_{sP_0}) \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)采用了  $(1 + \gamma)R_{sp_0} \gg (1 + k_{p_0})\Delta R_s$  进行近似, 适用于 SAR 的工作距离大于测绘区的宽度, 一般情况都满足。可见  $k$  可表示成  $R_s$  的一次函数, 即

$$k = k_0 + k_1 R_s \quad (18)$$

其中

$$k_0 = k_{p_0} + \frac{(1 + k_{p_0})(k_{p_0} - \gamma)}{(1 + \gamma)} \quad (19)$$

$$k_1 = -\frac{(1 + k_{p_0})(k_{p_0} - \gamma)}{(1 + \gamma)R_{sp_0}} \quad (20)$$

将式(18)代入式(10), 并将  $1/k$  进行一次泰勒展开, 即  $1/k \approx 1/k_0 - (k_1 R_s)/k_0^2$  可得

$$f_{dr} R_s = c_0 + c_1 R_s \quad (21)$$

其中

$$c_0 = -\frac{V^2}{\lambda} \left[ \frac{1 + k_0}{k_0} \cos^2 \theta_T + (1 + k_0) \cos^2 \theta_R \right] \quad (22)$$

$$c_1 = -\frac{V^2 k_1}{\lambda} \left( \cos^2 \theta_R - \frac{\cos^2 \theta_T}{k_0^2} \right) \quad (23)$$

式(21)为本文推导的多普勒斜率与距离和的关系式。由式(21)可知,  $f_{dr} R_s$  与  $R_s$  成线性关系, 在实测数据处理时, 可通过估计几个距离门的多普勒调频斜率进行拟合, 得到  $c_0$ ,  $c_1$  的值, 再根据式(21)计算出每个距离门的多普勒调频斜率, 然后进行距离徙动校正, 二次距离压缩与方位压缩实现成像。图 2 为针对实测数据的变多普勒参数的双基地 RD 算法流程图, 由于实测数据中存在时间同步误差, 其中调整接收距离门为校正时间同步误差。

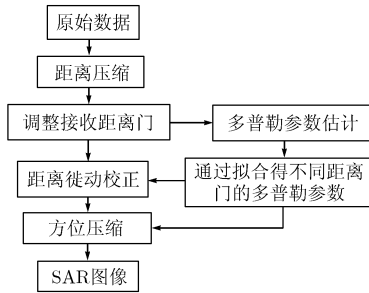


图 2 双基地 RD 成像算法流程图

### 3 仿真及实测数据处理结果

#### 3.1 拟合多普勒斜率误差分析

由于把多普勒斜率从双距离变量域(式(10))转换为距离和变量域(式(21))是采取适当的近似得到的, 以下通过仿真分析这种近似带来的误差, 并与常规 RD 算法进行比较。

仿真参数如表 1 所示, 利用多普勒估计算法估计几个距离门的多普勒调频斜率, 然后通过式(23)进行拟合得到不同距离单元的调频斜率, 并与式(8)计算的多普勒斜率进行比较。图 3 中实线为式(8)调频斜率随距离和  $R_s$  变化的关系, 虚线为拟合得到的调频斜率随距离和  $R_s$  变化的关系, 两条线

表 1 仿真参数

几何参数	信号参数
发射机坐标(-250, -250, 300)m	脉宽 10 $\mu$ s
发射机速度(0, 45, 0)m/s	带宽 150MHz
接收机坐标(250, 250, 300)m	采样频率 200MHz
接收机速度(0, 45, 0)m/s	PRF500Hz
场景中心坐标(2, 0, 0)km	载频 10GHz

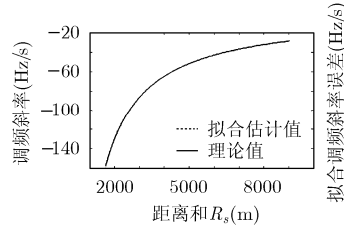


图 3 调频斜率与距离和的关系

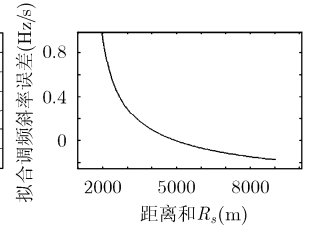


图 4 拟合调频斜率的误差

基本重合在一起。图 4 为拟合得到调频斜率的误差, 可以看出在作用距离和  $R_s$  大于 3km 时, 拟合得到的调频斜率误差很小, 通过该方法可有效估计不同距离门的调频斜率。

图 5, 图 6 分别为用本文算法和常规 RD 算法对 3 个点目标的成像结果。由图可以看出常规 RD 算法对近场与远场的点目标成像较差, 而本文的算法具有更好的成像效果。

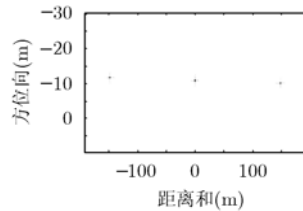


图 5 本文算法成像结果

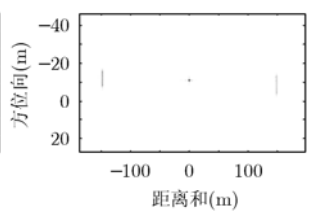


图 6 常规 RD 算法成像结果

#### 3.2 实测数据处理

本文用的实测数据来源于电子科技大学的双基地机载实验, 在实验中双基地 SAR 工作在非移变模式下, 由于天线功率等问题, 飞机的飞行高度低, 作用距离近, 导致调频斜率在测绘区内变化大。在实测数据的处理中采取了本文的变多普勒参数的双基地 RD 成像算法和常规 RD 算法, 两种成像算法的成像结果见图 9, 其中圆圈表示 SAR 图像与光学图中相对应的典型区域。

在本文的算法处理过程中利用了 DCFT 多普勒参数估计方法<sup>[5]</sup>和最大对比度算法进行多普勒参数估计。在距离压缩与时间同步误差校正后, 为了提高多普勒参数估计精度, 即采用变多普勒参数, 实际处理中选取了 15 个含强点目标的距离门数据进行多普勒参数估计, 然后拟合, 并利用式(23)得到每个距离门的多普勒调频率。图 7 为利用实测数据得到

的  $f_{dr}R_s$  与  $R_s$  的线性拟合图, 图 8 为不同距离门的多普勒斜率估计值。再进行距离徙动校正、二次距离压缩及方位压缩, 得到成像结果如图 9(b)所示。

图 9(c)为常规 RD 算法处理的结果, 在处理时调频斜率选用了其中的一个估计值(-120.5Hz/s)对整个场景进行处理。从视觉上看成像质量低于图 9(b), 尤其在场景的近场与远场地区存在散焦情况, 可以看出本文的算法在实测数据处理时有较好的成像效果及实用性。

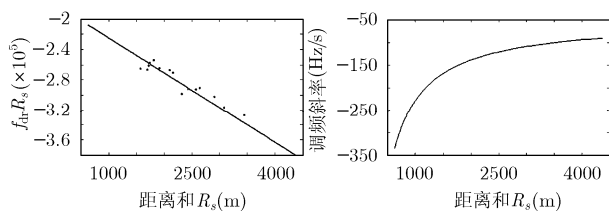


图 7  $f_{dr}R_s$  与  $R_s$  线性拟合

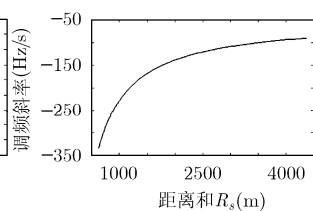


图 8 不同距离门的多普勒斜率估计值

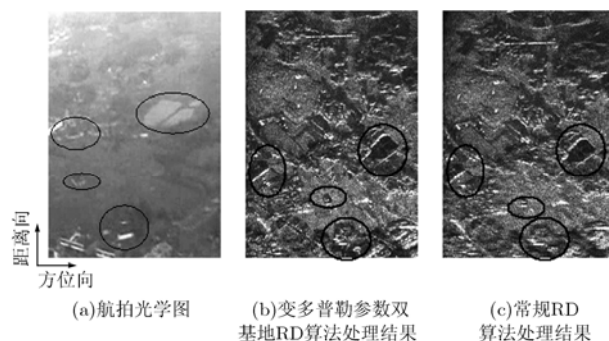


图 9 光学图和成像图

## 4 结束语

本文针对双基地 SAR 非移变工作模式, 提出了一种变多普勒斜率的双基地 RD 成像算法。该算法利用本文建立的多普勒斜率与距离和的关系式, 通过拟合得到不同距离门的调频斜率, 分析了拟合多普勒斜率误差, 最后通过仿真以及实测的双基 SAR 数据进行成像处理, 验证了该方法的有效性, 并与常规 RD 算法进行了比较, 显示了该方法的优越性。

## 参考文献

- [1] Ender J H, Walterscheid I, and Brenner A. New aspects of bistatic SAR: processing and experiments. Proc. IGARSS, Anchorage, US, Sep, 2004: 1758-1762.
- [2] Walterscheid I and Ender J H. Bistatic SAR processing and experiments. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2710-2717.
- [3] Loffeld O, Nies H, Peters V, and Knedlik S. Models and useful relations for bistatic SAR processing. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [4] Yates G, A Horne M, Blake A P, Middleton R, and Andre D B. Bistatic SAR image formation. Proc. EUSAR, Ulm, Germany, May 2004: 581-584.
- [5] Xia Xiang-Gen. Discrete Chirp-Fourier Transform and its application to chirp rate estimation. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2000, 48(11): 3123-3133.

龚镇强: 男, 1984年生, 硕士生, 从事双基地SAR成像处理方面的研究。

张晓玲: 女, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达成像、三维 SAR 及双多基地 SAR 成像等方面的研究和教学工作。